

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Kauther, Regina; Günther, Christian**

## **Veränderlich-feste Gesteine als geotechnisches Material am Beispiel des Tonsteins aus Minden**

BAWMitteilungen

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104391>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kauther, Regina; Günther, Christian (2017): Veränderlich-feste Gesteine als geotechnisches Material am Beispiel des Tonsteins aus Minden. In: BAWMitteilungen 101. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 49-60.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Veränderlich-feste Gesteine als geotechnisches Material am Beispiel des Tonsteins aus Minden

## *Minden Mudstone as an Example of Slaking Rock Material*

Dipl.-Ing. Regina Kauther, Christian Günther M. Sc., Bundesanstalt für Wasserbau

Veränderlich-feste Gesteine verlieren unter Witterungseinflüssen innerhalb relativ kurzer Zeit ihre Festigkeit. Dieser Festigkeitsverlust ist nicht reversibel. Die Untersuchung dieser Gesteine unter rein bodenmechanischen oder felsmechanischen Gesichtspunkten hat sich als nicht ausreichend erwiesen. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über Fragestellungen und Erfahrungen bei den geotechnischen Untersuchungen veränderlich-fester Gesteine am Beispiel des Tonsteins in Minden und diskutiert die Frage nach der Notwendigkeit, eine eigenständige Materialgruppe zwischen Locker- und Festgestein zu definieren.

*Some rocks exhibit disintegrating behaviour which varies from spontaneous decay to slow decomposition within months to years. The loss of strength is irreversible. Investigations of this type of rock considering only soil-mechanical or rock-mechanical aspects are obviously not sufficient. The paper gives an overview of the issues to be addressed and describes experiences with Minden mudstone as an example of slaking rock, both on site and in lab tests. Moreover, a discussion is initiated as to whether it would be useful to define a special group of material to meet the requirements for slaking rock.*

### 1 Nicht Boden, nicht Fels – Was ist unter veränderlich-festem Gestein zu verstehen?

#### *Characteristics of slaking rock*

#### 1.1 Merkmale der veränderlich-festen Gesteine

##### *Distinctive features of slaking rock material*

Die Bezeichnung „veränderlich-fest“ wurde in den 50er-Jahren von Keil (1954) als Gesteinskategorie in Abgrenzung zu den dauerhaft-festen Gesteinen eingeführt. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Gesteinskategorien werden von Keil auf die Qualität und Stabilität der Kristallgitter bzw. auf deren Gitterenergie zurückgeführt. Demgegenüber steht die Oberflächenenergie, die bei der Wechselwirkung zwischen Wasser und Mineral als Adsorptions- und Absorptionskraft in Erscheinung und somit als kapillare Druckkraft auftritt. Bei veränderlich-festen Gesteinen tritt die Gitterenergie gegenüber der Oberflächenenergie und der Wasseraffinität zurück. Je stärker die Wechselwirkung zwischen Mineral und Wasser ist, desto größer sind die Möglichkeiten der Störung des Kristallgitters und somit auch die Wasserempfindlichkeit. Darüber hinaus spielt die Porosität eine wichtige Rolle.

Beispiele für veränderlich-feste Gesteine sind vor allen Dingen feinkörnige Sedimentgesteine wie Tonsteine, Schluffsteine, tonig gebundene Sandsteine und Mergelsteine. Solche Gesteine haben besondere Eigenschaften (Lempp, 1979), die sie sowohl von Festgesteinen (Fels) als auch von Lockergesteinen (Boden) unterscheiden:

- Das veränderlich-feste Gestein zeigt sich bei der Freilegung in der Regel als Festgestein, das felsmechanisch nach DIN EN ISO 14689-1 angesprochen und beurteilt werden kann. Dies betrifft z. B. das Gefüge, die Trennflächencharakteristik, die Oberflächenbeschaffenheit der Trennflächen und die Festigkeit.
- Eine Wasserlagerung bzw. eine intensive Befeuchtung des frischen Gesteins hat keine erkennbaren Veränderungen zur Folge, auch wenn das Gestein über Wochen, Monate und Jahre in Wasser eingetaucht bleibt. Untersuchungen von Lempp (1979), bei denen das Gestein während der Wasserlagerung immer wieder gewogen wurde, ergaben, dass es in der Versuchszeit keine messbaren Mengen an Wasser aufnimmt und dass das Probengewicht um einen Mittelwert pendelt. Vergleichbare Versuche in der BAW in den 80er-Jahren wurden mit dem gleichen Ergebnis durchgeführt. Auch bei einer Durchströmung der Proben in Anlehnung an einen Pinholetest oder bei der Durchführung von Turbulenzversuchen zeigen die Gesteinsproben keine Zerfalls- oder Lösungserscheinungen.
- Die abwechselnde Einwirkung von Trocknung und Befeuchtung hat sehr umfassende und irreversible Veränderungen zur Folge: Ein monolithischer Gesteinskluftkörper zerfällt in viele, je nach Material in verschieden große und verschieden geformte Bruchstücke oder Bröckchen von Sand- und Kiesgröße. Ein Zerfall kann sich beim Beregnen der luftgetrockneten Probe innerhalb weniger Minuten vollziehen. Die Bröckchenbildung ist außerdem mit einem Quellen des Gesteins verbunden.
- Die Bröckchen können bei zusätzlicher mechanischer Beanspruchung im trockenen Zustand in kleinere Aggregate zerbrechen, sie bleiben jedoch unverändert hart. Bei mechanischer Beanspruchung im nassen und feuchten Zustand kommt es materialabhängig zu einer Plastifizierung, die in Abhängigkeit der Höhe der Beanspruchung dazu führen kann, dass die Bröckchenstruktur verloren geht und das

Material zunehmend den Charakter eines feinkörnigen Bodens bekommt.

Bild 1 illustriert einen Trocknungs-Befeuchtungsversuch an einer zylindrischen Tonsteinprobe. Der Zerfallsprozess wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Die Probe wurde 48 h im Trockenofen bei 30°C getrocknet (Bild 1: 0 s) und anschließend einmalig mit Wasser benetzt (Bild 1: 30 s). Nach 429 Sekunden hat die Probe das Wasser aufgesaugt und es hat sich ein Netz von Rissen gebildet. Versucht man die Probe in die Hand zu nehmen, zerfällt sie (Bild 1: 435 s; Bild 1: 440 s).

## 1.2 Ursachen für den Zerfall von veränderlich-festen Gesteinen

### *Disintegration process of slaking rock*

Untersuchungen zur Ursache des Zerfalls der veränderlich-festen Gesteine im deutschsprachigen Raum wurden insbesondere im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes von Lempp (1979) und Merklein (1982) an der Universität Tübingen durchgeführt. Ziele dieser Untersuchungen waren, die Ursachen für die Entfestigung der veränderlich-festen Ton-, Schluff- und Mergelsteine zu finden und die Veränderungen der Tragfähigkeit zu messen, die aufgrund der Entfestigung eintreten.

Lempp (1979) führt den Zerfall veränderlich-fester Gesteine auf eine Kompression der Porenluft im teilgesättigten Bereich der Gesteine zurück. Bei der Trocknung werden durch Schrumpfung und damit verbundener Spannungsumlagerungen im Gestein die diagenetischen Bindungen zwischen den Körnern lokal geschwächt oder zerstört. Zusätzlich kann in die durch Trocknung entstandenen Risse und teilweise entwässerten Poren Luft eindringen. In diesem Zustand wird das Gestein durch die noch vorhandenen Bindungskräfte und die Kapillarkräfte zusammengehalten. Wird das veränderlich-feste Gestein von außen durch ein-



Bild 1: Zerfallsversuch mit einer zylindrischen Tonsteinprobe

Figure 1: *Slaking test with mudstone specimen*

dringendes oder kapillar aufsteigendes Wasser wieder befeuchtet, nimmt es das Wasser in Folge hoher Saugspannungen so schnell in die teilgesättigten Hohlräume auf, dass die Porenluft nicht entweichen kann. Diese wird zusammengepresst und der Porenluftdruck erhöht sich. Die ohnehin durch Trocknung geschwächten diagenetischen Bindungen reißen entlang der schwächsten Glieder auf. Nun kann sich an die vormaligen diagenetischen Bindungen Wasser anlagern (Hydratisierung), sodass an diesen Stellen keine neuen stabilen Bindungen mehr entstehen können. Damit ist eine Neubildung der alten diagenetischen Bindungen ausgeschlossen und der Prozess irreversibel. Bei der Interaktion mit Wasser treten im Gestein zusätzlich Quellvorgänge auf. Da dies parallel zur Entfestigung des Gesteinsverbandes geschieht, kommt es zu einem Verlust des Zusammenhaltes und der Kohäsion zwischen den Tonsteinbröckchen. Weitere Feucht-Trocken-Wechsel bewirken eine immer stärkere Zerkleinerung der einzelnen Gesteinskörper.

Diese Forschung wurde im Rahmen der Dissertation von Bönsch (2006) zum Teil wieder aufgenommen. Sie untersuchte die Zerfallserscheinungen an Röt-Tonsteinen, am Opalinuston sowie an einem tertiären Ton. Ihr zufolge hat die Zersetzung von veränderlich-festen Gesteinen ihre Hauptursache in unterschiedlichen Saugspannungen benachbarter Bereiche im Gestein. Infolge der von außen nach innen fortschreitenden Verwitterung der veränderlich-festen Gesteine entstehen Bereiche mit unterschiedlichen Porengrößen. Die verwitterten Bereiche werden mit fortschreitender Zersetzung aufgelockert und verfügen dementsprechend über größere Porenradialen als die unverwitterten Bereiche. In den bergfrischen Bereichen sind die Tonminerale nach wie vor schichtparallel angeordnet, wodurch hier kleinere Porenradialen vorherrschen. Durch die größeren Poren baut sich die Saugspannung im verwitterten Bereich relativ gleichmäßig ab, wohingegen diese im unverwitterten Bereich ungleichmäßig dissipiert. Dadurch entstehen Unterschiede in der Größe der Saugspannung benachbarter Bereiche, womit sich eine Zugspannung im Gestein aufbaut. Diese führt zur Deformation des Korngerüsts, wodurch dieses versagen kann, wenn dessen Festigkeit überschritten wird.

Seit etwa 20 Jahren werden insbesondere in der Schweiz (Felslabor Mont Terri), in Belgien (High Activity Disposal Experimental Site „HADES“, Mol) und in Frank-

reich (Underground Research Laboratory, Bure) thermisch-mechanisch-hydraulisch gekoppelte Vorgänge in Tonsteinen mit Hinblick auf ihre Eignung als geologisches Tiefenlager für radioaktiven Abfall untersucht. Bei dem in der Schweiz untersuchten Opalinuston werden vor allen Dingen osmotische Vorgänge als Ursache für die Veränderlichkeit vermutet (Bossart, Thury, 2008; Heitzmann, 2004).

Von Untersuchungen zur Entfestigung veränderlich-fester Gesteine infolge von Osmosevorgängen wird auch in Publikationen aus dem Bereich der Öl- und Gasindustrie (Simpson, Dearing, 2000; Lal, 1999) berichtet. Das Interesse liegt hier auf festigkeitsmechanischen Fragestellungen im Hinblick auf die weltweit stark wachsende Schiefergasförderung. Hier muss jedoch mit z. T. mehreren tausend Metern Überlagerungsdruck gerechnet werden, sodass die Randbedingungen dieser Untersuchungen sich stark von denen der oberflächennahen Geotechnik unterscheiden.

Der beschriebenen Unterschiede der angenommenen Zerfallsmechanismen zum Trotz, existieren grundlegende Gemeinsamkeiten der Prozesse. Der Ausgangspunkt der Desintegration ist stets ein natürlich oder künstlich herbeigeführtes chemisches oder physikalisches Ungleichgewicht, welches durch den Zerfallsprozess ausgeglichen wird. Dabei wird die Zugfestigkeit des diagenetisch verfestigten Korngerüsts überschritten.

## 2 Charakteristik des Tonsteins in Minden

### *Characteristics of Minden mudstone*

Im Zuge der Anpassung der Mittelweser an das Großmotorgüterschiff wird am Wasserstraßenkreuz in Minden die neue Weserschleuse östlich der bestehenden Schachtschleuse gebaut. Die neue Schleuse ist 139 m lang, 12,5 m breit und besitzt eine Hubhöhe von ca. 13,7 m. Bauherr der Schleusenanlage ist das Neubauamt für den Ausbau des Mittellandkanals in Hannover. Eine detaillierte Beschreibung der Baumaßnahme und des Baugrubenkonzepts wurde von Kauther et al. (2013) veröffentlicht.

Der Baugrund im Bereich der neuen Schleusenanlage kann vereinfacht in drei Schichten unterteilt werden. Unter der Geländeoberkante befindet sich eine bis zu

12 m mächtige Auffüllung aus Ton, Schluff, Sand und Kies in verschiedenen Mengenanteilen. Darunter folgen quartäre, fluvio-glaziale Ablagerungen der Weser. Diese bestehen aus Sanden und Kiesen mit schluffigen und tonigen Bestandteilen sowie sandigen und tonigen Schluffen. Unter dieser Schicht stehen veränderlich-feste Tonsteine aus der Unterkreide (Hauterive) bis zur Endteufe der Bohraufschlüsse an.

## 2.1 Beschreibung des Tonsteins

### *Description of Minden mudstone*

Insgesamt wurden ca. 1.250 m Tonstein auf der Grundlage der DIN EN ISO 14689-1 felsmechanisch angesprochen. In den Bohrungen zeigt sich der Tonstein in Minden als dunkelgraues bis schwarzgraues feinkörniges Sedimentgestein mit einem dichten, eher massigen Gefüge. Häufig auftretende Fossilien wie Muschelschalen sind meist schichtparallel ausgerichtet und begünstigen die Bildung von Trennflächen (Bild 2).



Bild 2: Schichtfläche des Tonsteins mit Fossilien  
Figure 2: *Bedding plane of Minden mudstone with fossils*

Der Tonstein besitzt ein ausgeprägtes orthogonales Trennflächensystem mit einer flach einfallenden Schichtung (Einfallen  $0^\circ$  bis  $12^\circ$ ) und überwiegend steilstehenden bis senkrechten Klüften. Der Schichtflächenabstand reicht nach DIN EN ISO 14689-1, Tabelle 6, von fein laminiert (kleiner als 6 mm) bis dick (600 mm bis 2.000 mm). Die Schichtflächen sind meistens eben ausgebildet, teilweise sind jedoch auch wulstige oder abgestuft-gebogene Schichtflächen zu beobachten. Die Klüftflächen sind vielfach gebogen und zeigen alle

Abstufungen von stufig-rauen bis eben-glaten Oberflächen. Klüftfüllungen treten recht häufig auf und sind meist in Form von tonigen Zerreibseln auf Scherbahnen zu finden. Gelegentlich treten auch karbonatische Klüftfüllungen auf. In den Bohrungen weisen die Klüftabstände eine Bandbreite von außerordentlich engstündig (kleiner als 20 mm) bis mittelständig (600 mm bis 200 mm) auf. In den Bohrungen lagen insgesamt vorwiegend sehr kleine bis kleine Gesteinskörper, seltener von mittlerer Größe, vor. Mit Hilfe der Handversuche der DIN EN 14689-1 kann die Festigkeit des Tonsteins im bergfrischen Zustand in die Kategorien „gering“ (5 MPa bis 25 MPa) bis „mäßig hoch“ (25 MPa bis 50 MPa) eingeordnet werden.

Auf der Grundlage der DIN EN ISO 14689, Teil 1, können die Tonsteinproben als „schwach verwittert bis frisch“ klassifiziert werden. Ein gradueller Übergang im Sinne eines Verwitterungsprofils bis zum frischen Fels konnte nicht nachgewiesen werden.

Die Dichte des Tonsteins wurde aus 91 Proben mit einem Mittelwert von  $2,50 \text{ g/cm}^3$  in den Grenzen von  $2,46 \text{ g/cm}^3$  und  $2,52 \text{ g/cm}^3$  ermittelt. Der Wassergehalt wurde an 116 Proben zwischen 5,0 Gew.-% und 6,8 Gew.-% mit einem Mittelwert von 5,8 Gew.-% bestimmt. Korreliert man den Wassergehalt mit der Dichte, ist ein genereller Trend einer Dichteabnahme mit steigendem Wassergehalt festzustellen. Ausgehend von einem gesättigten Porenraum ergeben sich aus den gemessenen Dichten Porositäten zwischen ca. 16 % und 11 %, was in der Größenordnung vergleichbarer Tonsteine liegt.

## 2.2 Erfahrungen beim Aushub der Baugrube

### *On-site experiences*

Für den Schleusenneubau war der Aushub einer bis zu 16 m tiefen Baugrube erforderlich. Der Verbau für die Baugrube besteht mit Ausnahme des Einfahrbereiches auf der westlichen Seite aus einer vierfach rückverankerten Bohrpfehlwand. Auf der Ostseite wurde die Baugrube geböscht. Beide senkrecht zur Hauptbaugrube abzweigenden Baugruben für die Sparbeckenlaufbauwerke besitzen ebenfalls geböschte Wände. Die Böschungsneigungen betragen im Tonstein  $70^\circ$  und im Lockergestein 1 : 1,5. Die maximale Böschungshöhe beträgt 14 m.



Aufgrund des gewählten Baugrubenkonzeptes mit geböschten Baugrubenwänden auf der Ostseite wurde der Tonstein in einer Höhe von ca. 9 m abschnittsweise freigelegt. Das Trennflächensystem aller 19 Teilböschungen konnte so direkt nach dem Aushub felsmechanisch aufgenommen werden.

Das flache Einfallen der Schichtung, das schon anhand der Bohrkerne festgestellt werden konnte, hat sich im Aufschluss bestätigt. Weiter war das orthogonale Hauptkluftsystem, dessen Richtungen in etwa parallel und senkrecht zur Schleusenachse orientiert sind, über die gesamte Böschungshöhe gut zu erkennen. Deutliche Unterschiede bestehen im Durchtrennungsgrad. Die Ost-West orientierten Hauptklüfte (quer zur Schleusenachse) besitzen einen sehr hohen Durchtrennungsgrad und konnten über Längen von mehr als 10 m verfolgt werden, während die Hauptklüfte parallel zur Schleusenachse oft nur einige Dezimeter lang sind und in der Orientierung breiter streuen. Entsprechend ergaben sich an den Böschungen parallel zur Schleusenachse kleine Kluftkörper, die eine sehr gute Profilierung der Böschung ermöglichten. An den Böschungen quer zur Schleusenachse bildeten sich in einigen Bereichen mehrere Meter hohe senkrecht stehende Wände aus, die das Profilieren der Böschungen erheblich erschwerten (Bild 3).

Abweichungen des Hauptklufteneinfalls aus der Vertikalen heraus (Unterschneiden der Böschung) führte zum Versagen von Kluftkörpern und zu Mehrausbrüchen. Teilbereiche mussten deshalb durch Felsanker gesichert werden.



Bild 3: Tonstein im Aufschluss  
Figure 3: Mudstone in pit

Auf der Baustelle konnte auch der typische oberflächennahe Zerfall des Tonsteins in Bröckchen infolge Witterungsangriffs sehr gut beobachtet werden. Der Bröckchenzerfall erfolgte innerhalb von Stunden und bewirkte eine Umwandlung des Gesteins in einer Tiefe von Dezimetern. Zwischen dem entfestigten und dem frischen Fels bildet sich dabei eine relativ eindeutige Grenze aus. Aus diesem Grund waren alle freigelegten Böschungsoberflächen innerhalb von 24 Stunden mit Spritzbeton abzudecken.

Zusammen mit mechanischer Beanspruchung, z. B. durch fahrende LKW, plastifizieren die Bröckchen. Die Baugrubensohle kann dadurch unbefahrbar werden (Bild 4).



Bild 4: Entfestigter und teilweise plastifizierter Tonstein auf der Baugrubensohle

Figure 4: Disintegrated and partly plastified mudstone on the pit bottom

Die Auswertung von Grundwasserstandsmessungen ergab großräumig sowohl für den quartären Porengrundwasserleiter als auch für den aus dem Tonstein gebildeten Kluftgrundwasserleiter eine Grundwasserströmung von Westen zur Weser, die den regionalen Hauptvorfluter darstellt. Zur Ermittlung der Durchlässigkeit wurden Slug- und Injektionstests mit konstanter Fließrate sowie Pumpversuche durchgeführt.

In diesem Fall ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen den aus den Bohrlochversuchen und den aus den Pumpversuchen ermittelten Durchlässigkeiten des Fels von ca.  $k = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ . Die für ein Festgestein relativ hohe Durchlässigkeit setzt einen hohen Durchtrennungsgrad der Schicht- und Kluftflächen im Ton-

stein voraus, der in seiner Wirksamkeit mit einem Porengrundwasserleiter verglichen werden kann (Hekel & Odenwald, 2012).

Während des Baugrubenaushubs konnten in-situ an mehreren Stellen (vor allen Dingen im unteren Aushubbereich) überraschend starke und ergiebige Wasseraustritte aus dem Tonstein aus offenen Klüften beobachtet werden. Dabei war der Wasserandrang teilweise so stark, dass kleinere Gesteinsstücke mitgerissen wurden (Bild 5). Die hohe Durchlässigkeit kann im Wesentlichen auf die Entspannung des Gesteins durch den Aushub und das damit verbundene Öffnen der Kluft- und Schichtflächen zurückgeführt werden. Offen bleibt, wie der starke und andauernde Wassernachschub zu erklären ist, und ob dieser mit den beschriebenen Ursachen des Zerfalls veränderlich-fester Gesteine im Zusammenhang steht.



Bild 5: Wasseraustritte im Tonstein

Figure 5: *Groundwater discharge from mudstone*

### 3 Konsequenzen aus der veränderlichen Festigkeit des Tonsteins

#### *Lessons learned by working with Minden mudstone*

Nach Nickmann (2005) ist die Untersuchung von veränderlich-festen Gesteinen deshalb so schwierig, weil es kein normiertes Untersuchungsprogramm gibt, das deren besondere Eigenschaften berücksichtigt. Im Folgenden werden drei Aspekte vorgestellt, die veränderte Untersuchungsstrategien im Vergleich zu den dauerhaften festen Gesteinen beschreiben. Diese sind: „Erkennen und Klassifizieren“, „Probenbehand-

lung“ und „Ermittlung von Festigkeitsparametern“. Die genannten Aspekte sind zudem im Zusammenhang zu sehen: Ohne dass das veränderlich-feste Gestein erkannt wird, kann keine adäquate Probenbehandlung erfolgen. Festigkeitsparameter werden daraufhin möglicherweise unzutreffend ermittelt, womit alle weiteren Fragestellungen von bautechnischer Relevanz verbunden sind.

#### 3.1 Erkennen und Klassifizieren von veränderlich-festen Gesteinen

##### *Identification and classification of slaking rock material*

Werden veränderlich-feste Gesteine im Vorfeld einer Baumaßnahme nicht erkannt, können Schäden die Folge sein. Von Sieler (2005) werden als mögliche Folgen das Abrutschen steiler Böschungen nach einer gewissen Standzeit, Risse in massiven Bodenplatten durch Setzungen oder der signifikante Anstieg von Kontaktspannungen in Tunnelschalen beobachtet. Ein Bezug zwischen auftretenden Schäden und dem anstehenden Felsmaterial wird in der Regel nicht hergestellt, da die veränderlich-festen Gesteine nicht als solche erkannt bzw. klassifiziert werden. Dies ist jedoch die grundlegende Voraussetzung für die adäquate Behandlung und die Erarbeitung felsmechanisch relevanter Festigkeitsparameter.

Die sechsstufige Unterteilung von Fels in die Verwitterungsstufen 0 bis 5 nach der DIN EN ISO 14689-1 bzw. nach dem „Merkblatt über das Bauen mit und im Fels“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen beschreibt den Fels im natürlichen Zustand. Eine Klassifikation der Veränderlichkeit veränderlich-fester Gesteine ist damit nicht möglich.

Ebenso wenig eignet sich die reine Wasserlagerung nach DIN EN ISO 14689-1, da, wie beschrieben, zum einen veränderlich-feste Gesteine im bergfeuchten Zustand bei Wassereinwirkung i. d. R. keinen Zerfall zeigen und zum anderen ein Zerfall bei einmaliger Wasserlagerung kein zwingender Hinweis auf eine veränderliche Festigkeit ist. Der Zerfall kann beispielsweise auch durch Strukturstörungen der Probe oder Entspannungsprozesse bei der Probennahme und dem Lösen aus dem Gebirgsverband hervorgerufen werden.

Auch der Wert der einaxialen Druckfestigkeit hat sich nicht als belastbare Größe für eine Abgrenzung der veränderlich-festen Gesteine von den dauerhaft-festen Gesteinen herausgestellt. Zum einen gibt es keinen klar definierten unteren Grenzwert für die einaxiale Druckfestigkeit eines dauerhaft festen Gesteins, zum anderen können veränderlich-feste Gesteine sehr große Festigkeiten bis 80 MPa besitzen.

Einen wesentlichen Beitrag zum systematischen Erkennen und Klassifizieren von veränderlich-festen Gesteinen stellen die Untersuchungen von Nickmann (2009) dar. Nickmann untersuchte 40 verschiedene Gesteine, darunter Sandsteine, Tonsteine und Mergel aus sieben Fundstätten. Die von Nickmann vorgeschlagene Klassifizierung beruht auf einer Modifizierung des Wasserlagerungsversuches nach DIN EN ISO 14689-1. Bei der „Nickmann-Prozedur“ wird ein dreifacher Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel durchgeführt, der den natürlichen Zerfallsprozess unter Witterungsangriff simuliert. Die erste Wasserlagerung erfolgt an einer frischen

Probe mit natürlichem Wassergehalt. Es wird sowohl die Sofortreaktion als auch der Probenzustand nach 24 Stunden Wasserlagerung festgestellt. Um quantitative Aussagen über den Zerfall treffen zu können, wird nach jeder Wasserlagerung mittels einer schonenden Siebung die „Korngrößenverteilung“ der entstandenen Aggregate und Körner ermittelt. Nach Ofentrocknung bei 50°C wird die Probe zwei weiteren Wasserlagerungen mit anschließender Siebung und Trocknung zugeführt.

Um eine Abgrenzung der veränderlich-festen Gesteine gegen die dauerhaft-festen Gesteine vorzunehmen, reichen die drei Wasserlagerungsversuche nicht aus, da die Beanspruchung noch zu gering ist. Deshalb wird zusätzlich ein Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat nach DIN EN 12370 durchgeführt. Aus dem Verhalten kann auf sechs Veränderlichkeitsklassen (VK) geschlossen werden (Tabelle 1), denen Wertebereiche des Veränderlichkeitsindex  $I_v$  zugeordnet sind. Der Veränderlichkeitsindex kann wie folgt berechnet werden:

VK	Veränderlichkeits-index $I_v$	Bezeichnung	Beschreibung
VK 0	285 – 300	Nicht veränderlich (dauerhaft fest)	Bis zum 3. Wechsel im Wasserlagerungsversuch keine Veränderungen (ausgenommen geringer Verlust durch gelockerte Aggregate $\leq 2,5$ %), keine Reaktion im Kristallisationsversuch (Verlust $\leq 10$ %).
VK 1	190 – 285	Gering veränderlich	Bis zum 3. Wechsel im Wasserlagerungsversuch keine Veränderungen (ausgenommen geringer Verlust durch gelockerte Aggregate $\leq 5$ %), Zerfall im Kristallisationsversuch (Verlust $> 10$ %).
VK 2	145 – 190	Langsam veränderlich	Bei einfacher Wasserlagerung keine Reaktion, bis zum 3. Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel Rissbildung und/oder beginnender Zerfall bis zu 50 % der Ausgangsmasse.
VK 3	92,5 – 145	Mäßig schnell veränderlich	Bei erstmaliger Wasserlagerung Rissbildung bzw. Abbrechen von kleineren Kluftkörpern oder Aggregaten (bis max. 10 %), Probestück bleibt aber erhalten. Bis zum 3. Wechsel Zerfall in Aggregate $> 2,5$ % der Ausgangsmasse.
VK 4	25 – 92,5	Schnell und stark veränderlich	Bei erstmaliger Wasserlagerung deutliche Desintegration (10 % – 75 %), bis zum 3. Wechsel Zerfall in Aggregate $\leq 2,5$ % der Ausgangsmasse.
VK 5	$< 25$	Unmittelbar und sehr stark veränderlich	Unmittelbarer Zerfall bei einmaliger Wasserlagerung in Aggregate $< 25$ %, bis zum 3. Wechsel in Teilchen $\leq 1$ % der Ausgangsmasse.

Tabelle 1: Veränderlichkeitsklassen nach Nickmann

Table 1: Categories of slaking disposition after Nickmann



$$I_v = R_{WL1} + R_{WL2} + R_{K10}$$

$R_{WL1}$  - Anteil größtes Stück nach 1. WL [%]

$R_{WL3}$  - Anteil größtes Stück nach 3. WL [%]

$R_{K10}$  - Anteil nach Kristallisationsversuch [%]

Der Veränderlichkeitsklasse VK 0 sind die dauerhaftesten Gesteine zugeordnet. Für Gesteine der Veränderlichkeitsklasse VK 1 bis 3 findet der Zerfall langsam statt. Baupraktische Probleme treten bei der Deposition und dem Wiedereinbau und bei Fragen nach der langfristigen Stabilität auf. Gesteine der Veränderlichkeitsklassen 4 und 5 reagieren bei Wasserzutritt schnell. Es muss mit unmittelbaren Stabilitätsproblemen und Problemen beim Transport des Materials gerechnet werden (Nickmann, 2005).

Der Veränderlichkeitsversuch nach Nickmann wurde auch für den Tonstein in Minden durchgeführt. Im Ergebnis zeigten alle sechs Tonsteinproben einen sehr raschen und starken Zerfall und sind daher mit einem Veränderlichkeitsindex zwischen 1,1 und 9,6 in VK 5 einzustufen. In Bild 6 sind die von Nickmann erarbeiteten Bereiche unterschiedlich starker Veränderlichkeit grafisch dargestellt. Eingetragen sind zudem die Versuchsergebnisse für den Tonstein in Minden.

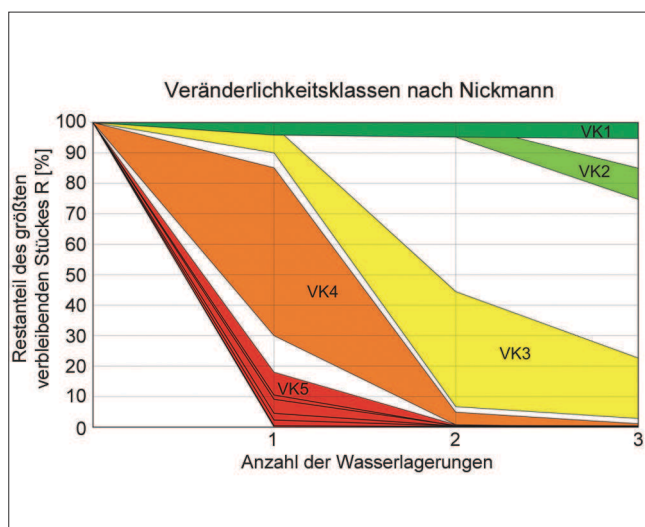


Bild 6: Verlauf des Zerfallsprozesses bei dreifachem Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel (nach Nickmann, 2005)

Figure 6: Disintegration in a cyclic wetting-drying test with three cycles (according to Nickmann, 2005)

### 3.2 Probenbehandlung

#### *Processing and handling of specimen*

Voraussetzung für die Ermittlung von Festigkeitsparametern für das bergfrische Festgestein ist, eine Veränderung des Wassergehaltes und damit einen Beginn des Zerfallsprozesses zu verhindern. Zwar kann argumentiert werden, dass durch das Auftreten der Trocknungsrisse das Gestein geschwächt wird und z. B. einaxiale Druckfestigkeiten auf der sicheren Seite bestimmt werden, jedoch entwickeln sich mit der Trocknung auch Saugspannungen, die bis zu mehreren Hundert MPa betragen können und mit einer Verfestigung des Gesteins verbunden sind. Beide Effekte müssen vermieden werden. Nicht zu vermeiden ist die entlastungsbedingte Gesteinsentspannung beim Herauslösen der Bohrkern aus dem Verband.

Eine adäquate Probenbehandlung beginnt bei Auswahl des Bohrverfahrens und setzt sich mit Fragen des Probentransportes, der Probenlagerung, der Formatierung der Proben bis zum Einbau der Proben in den Versuchstand fort.

Die Gewinnung von Proben im Tonstein erfolgte mit Hilfe des Seilkernbohrverfahrens mit Doppelkernrohr und Liner. Da vom Tonstein in Minden bekannt war, dass es sich um ein veränderlich-festes Gestein handelt, wurden die Prüfkörper im Labor zur Vermeidung von Feuchtigkeitsverlusten aufwändig vorbereitet. Dafür wurde jedes einzelne Kernstück unmittelbar nach der fotografischen Dokumentation der Kerne im Liner und der felsmechanischen Ansprache in Aluminiumfolie eingeschlagen und mit flüssigem Paraffin beschichtet. Zusätzlich wurden die Kerne anschließend in alubeschichtete Kunststofffolien eingeschweißt. Aufgrund dieser sorgfältigen Probenvorbereitung wiesen die Proben nahezu in-situ-Feuchtegehalte auf. Die Formatierung der Kerne für die Durchführung von Einaxial- und Triaxialversuchen erfolgte unter ständiger Bewässerung. Danach wurden die Proben zügig in die jeweiligen Versuchsstände eingebaut. Die Erfordernis dieser Vorgehensweise zeigt das Bild 7, auf dem die Trockenrisse einer Kernprobe zu sehen sind, die lediglich eine Stunde der Raumluft ausgesetzt war.

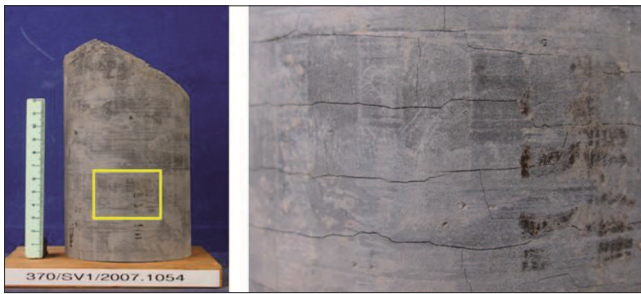


Bild 7: Ausbildung von Trockenrissen im Tonstein nach einer Lagerung von ca. 1h an der Luft (Endstück der Probe BKF12 - 370-SV1-2007.1054). Quelle: Institut für Gebirgsmechanik (IfG), Leipzig, 2008

Figure 7: Formation of desiccation cracks in mudstone after 1 hour exposure to air. Source: IfG, 2008

### 3.3 Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit *Determination of uniaxial compression strength*

Die Laborversuche zur Ermittlung der ein- und dreiaxialen Scherfestigkeit wurden im Auftrag der BAW vom Institut für Gebirgsmechanik (IfG) in Leipzig durchgeführt. Einaxiale Druckversuche wurden an 77 Proben durchgeführt. Zur Quantifizierung gefügeinduzierter Anisotropie wurde die einaxiale Druckfestigkeit sowohl parallel zur Schichtung (quer zum Bohrkern, UCQ-Probe) als auch senkrecht zur Schichtung (längs zum Bohrkern, UCL-Probe) bestimmt. Als Verformungsrate wurde eine konstante Dehnungsgeschwindigkeit von  $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  gewählt. Zur Bestimmung der elastischen Konstanten erfolgte eine Zwischenentlastung der Prüfkörper. Während der Belastung werden die vertikale Belastung  $\sigma_1$  und die vertikale Verformung  $\epsilon_1$  sowie die radiale Dehnung  $\epsilon_3$  aufgezeichnet.

Im Vergleich zu der bei der Ansprache im Durchschnitt ermittelten gering bis mäßig hohen Festigkeit nach DIN EN ISO 14689-1 wurde in den Laborversuchen lediglich eine geringe Festigkeit festgestellt. Aus den Versuchen ergeben sich systematische Unterschiede für die Bruchspannung und die maximale Dehnung bis zum Bruch sowie für den probenspezifischen E-Modul. Die Bruchfestigkeit der parallel zur Schichtung geprüften Proben beträgt im Mittel  $\sigma_{u,q} = 9,2 \text{ MN/m}^2$  mit einer Standardabweichung von  $\pm 1,9 \text{ MN/m}^2$ , senkrecht zur Schichtung ergab sich ein Mittelwert von  $\sigma_{u,l} = 7,7 \text{ MN/m}^2$  mit einer Standardabweichung von  $\pm 1,7 \text{ MN/m}^2$ . Damit lässt sich für die einaxiale Bruchfestigkeit in schichtparalleler Richtung ein ca. 20 % größerer Wert feststellen.

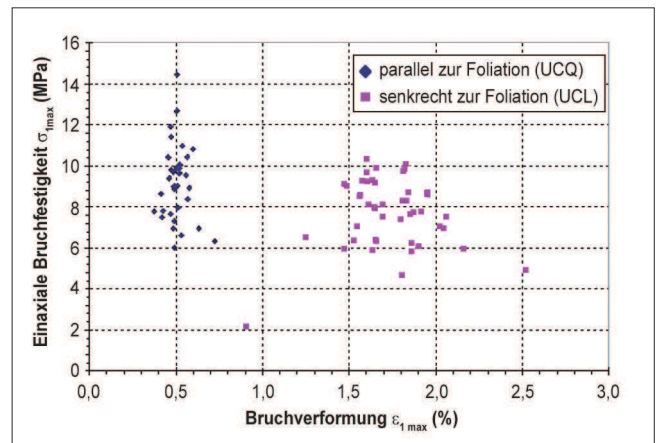


Bild 8: Auswertung der einaxialen Druckversuche in Abhängigkeit der Belastungsrichtung (Einaxiale Bruchfestigkeit vs. Bruchdehnung). Quelle: Institut für Gebirgsmechanik (IfG), Leipzig, 2008

Figure 8: Analysis of uniaxial compression tests as a function of the direction of loading (uniaxial rupture strength vs. elongation at rupture), Source: IfG, 2008

Der Bruch tritt bei den parallel zur Schichtung belasteten Proben bei signifikant kleineren Verformungsgraden häufiger auf als bei den senkrecht zur Schichtung belasteten Proben auf (Bild 8).

Die ermittelte Anisotropie des Tonsteins in Minden kann als für Tonsteine charakteristische schicht- oder foliationsbezogene Gefügeanisotropie interpretiert werden (Popp & Salzer, 2007). Sie resultiert aus der sedimentären Ablagerungsgeschichte der Tonpartikel, vorzugsweise Tonmineralplättchen, und der nachfolgenden Konsolidierung. Als Folge weisen alle physikalischen Gesteinseigenschaften eine erhebliche foliationsbezogene Transversalanisotropie auf. Inwiefern Anisotropie darüber hinaus ein Merkmal veränderlich-fester Gesteine ist, bedarf zusätzlicher Untersuchungen.

### 3.4 Ermittlung der Scherfestigkeit *Determination of triaxial shear strength*

Da sich veränderlich-feste Gesteine zunächst als Festgestein zeigen, liegt es nahe, die Proben zunächst in felsmechanischen Versuchen zu untersuchen. Dies bedeutet, dass der Schutz der Proben vor einer Veränderung des Wassergehalts möglicherweise vernachlässigt wird. Aufgrund des Erscheinungsbildes der veränderlich-festen Gesteine als Festgestein werden Triaxialversuche dann auch unter felsmechanischen Versuchsbedingungen ausgeführt. Dies bedeutet, dass zum einen

die Porenwasserdruckmessung entfällt, zum anderen die Versuche mit einer größeren Versuchsgeschwindigkeit ausgeführt werden

In einer parallelen Versuchsreihe wurden im boden- und felsmechanischen Labor der Landesgewerbeanstalt (LGA) Nürnberg Keupertonsteinproben unter felsmechanischen und unter bodenmechanischen Randbedingungen untersucht (Sieler, 2005). Für die felsmechanischen Versuche wurde entsprechend dem üblichen Vorgehen eine Belastungsgeschwindigkeit von 0,05 % der Probenhöhe pro Minute gewählt. Bei üblichen Bruchdehnungen für den Versuch bis zum Ende von etwa 5 % bedeutet dies eine Versuchsdauer von 100 Minuten. Die Probe wird dabei ohne Messung des Porenwasserdrucks abgeschert. Für die bodenmechanischen Versuche wurde die minimal mögliche Belastungsgeschwindigkeit von 0,001 mm/min gewählt. Dies führt zu einer Versuchsdauer bis zum ersten Bruch von ca. ein bis zwei Tagen. Die Proben wurden gesättigt, anschließend erfolgte der Schervorgang.

Die Auswertung der Versuche zeigt deutliche Unterschiede für die vergleichsweise schnell gefahrenen felsmechanischen Versuche mit den bodenmechanischen Versuchen unter Berücksichtigung des Porenwasserdrucks. Im ersten Fall wird letztendlich eine undrainede Scherfestigkeit bestimmt. Die Auswertung der nach bodenmechanischen Versuchsrandbedingungen gefahrenen Versuche zeigt, dass die Tonsteine des Keupers eigentlich stark reibungsbetonte Festigkeits-eigenschaften aufweisen und zudem die für Standsicherheitsberechnungen weit ungünstigeren Werte ergeben. Die Versuchsergebnisse von Sieler (2005) sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Versuchsdurchführung	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ]
felsmechanisch (schnelle Belastung)	30	700 (130 minimal)
bodenmechanisch (langsame Belastung)	50	37

Tabelle 2: Festigkeitswerte eines Keupertonsteins bei unterschiedlichen Versuchsdurchführungen

*Table 2: Measured peak shear strength of Keuper claystone under drained and undrained testing conditions*

Auch für den Tonstein in Minden kann gezeigt werden, dass felsmechanische Versuchsrandbedingungen nicht zum Ziel führen. Untersucht wurden vier Kernproben im Triaxialversuch mit Porenwasserdruckmessung mit Manteldrücken zwischen 0,5 MN/m<sup>2</sup> und 10 MN/m<sup>2</sup> und zwei Kernproben im Triaxialversuch mit verminderter Versuchsgeschwindigkeit mit Manteldrücken von 3 MN/m<sup>2</sup> bzw. 7 MN/m<sup>2</sup>.

Für die Versuche mit Porenwasserdruckmessung wurden Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm mit einer durchgehenden Bohrung  $\varnothing = 4$  mm versehen. Die Aufsättigung der Probe erfolgte unter geringer Anfangsbelastung (Einspannung ca. 2 bar). Nach Applikation eines initialen Porendrucks von ca. 1 bar erfolgte die hydrostatische Belastung bis auf den Prüfdruck. Die Verformungsrate für die deviatorische Belastung betrug  $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-5}$  1/s. Die Triaxialversuche wurden mit langsamerer Verformungsrate mit einem Probendurchmesser von 100 mm mit den Verformungsraten  $\dot{\epsilon} = 1$  bzw.  $2 \cdot 10^{-7}$  1/s durchgeführt. Eine durchgehende Innenbohrung  $\varnothing = 4$  mm sollte dabei drainierte Bedingungen gewährleisten.

In Bild 9 ist beispielhaft ein Triaxialversuch mit Porenwasserdruckmessung mit einem Manteldruck von 10 MPa dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich bereits während der Belastung ein signifikanter Porendruck bis über 80 % des Prüfdrucks aufbaut. Bei

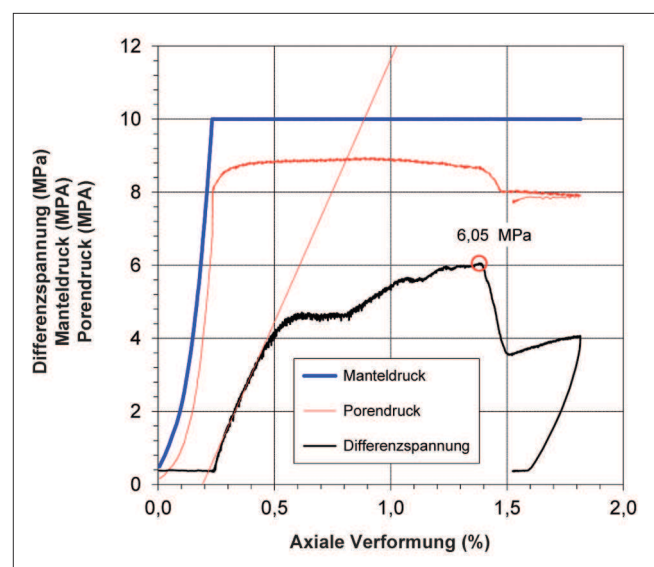


Bild 9: Verformungsexperiment BKF 13/0850 TC 6 mit Dilatanzmonitoring. Quelle: Institut für Gebirgsmechanik (IfG), Leipzig, 2009

*Figure 9: Triaxial test BKF 13/0850 TC6 with measurement of the dilatancy. Source: IfG, 2009*

deviatorischer Belastung nimmt der Porendruck bis zum Erreichen der Peak-Festigkeit noch zu. Im Moment des Scherbruchs mit Erreichen des Restfestigkeitsmaximums tritt ein deutlicher Abfall des Porenwasserdrucks auf, der sich auf einem niedrigeren Niveau wieder stabilisiert.

Auffallend war der nur geringe Einfluss einer Verringerung der Verformungsrate, wobei trotz einer Reduzierung um den Faktor 50 insgesamt nur eine geringe Festigkeitsabnahme beobachtet wurde.

Für die Erarbeitung konventioneller, bautechnisch verwertbarer effektiver Scherparameter wird hier noch Forschungsbedarf gesehen. Dies betrifft insbesondere die Fragen einer geeigneten Konsolidierung, Sättigung und Abschergeschwindigkeit (Lempp, 2016).

## 4 Zusammenfassung und Ausblick *Conclusions and outlook*

Obwohl veränderlich-feste Gesteine in Süd- und Mitteldeutschland und in angrenzenden Gebieten wie den Kalkalpen große Teile der oberflächennahen Gesteinschichten einnehmen, wird diese Gesteinskategorie in der DIN EN ISO 14689-1 „Benennung und Beschreibung von Fels“ begrifflich nicht klar gefasst. Abgrenzungen fehlen z. B. zu Begriffen wie „Halbfestgestein“, „weicher Fels“ oder „verwitterter Fels“. In der Tabelle AA.1 des EC7, Band 2, wird Fels, der zur Auflösung oder zu starkem Zerfall neigt, z. B. Salz, Gips und verschiedene veränderlich-feste Gesteine, in die Kategorie GK3 als ungewöhnliche und besonders schwierige Baugrundverhältnisse eingeordnet. Trotzdem werden die veränderlich-festen Gesteine in den deutschsprachigen Standardwerken der Geotechnik, wie z. B. dem Grundbautaschenbuch, nur am Rande erwähnt.

In der derzeit verwendeten Zweiteilung des Baugrundes in Boden und Fels werden die veränderlich-festen Gesteine der Kategorie „Fels“ zugeordnet. In dieser Zuordnung sind die veränderlich-festen Gesteine mit ihren besonderen Eigenschaften wenig präsent. Die Definition einer eigenen Kategorie zwischen Boden und Fels würde zum einen den Besonderheiten mehr gerecht, zum anderen wird eine klarere sprachliche Abgrenzung erzwungen. Es kann davon ausgegangen werden, dass damit die Entwicklung von Konzepten und Strategien

insbesondere bei der Ermittlung bautechnisch relevanter Parameter, wie z. B. der effektiven Scherfestigkeit, gefördert wird.

Aus den bisherigen Erfahrungen mit veränderlich-festen Gesteinen im Allgemeinen und dem Tonstein in Minden im Besonderen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Wichtig ist sich zunächst Klarheit zu schaffen, ob sich bei im Untergrund anstehenden Material überhaupt um veränderlich-feste Gesteine handelt. Hier kann die systematische, jedoch noch nicht standardisierte Vorgehensweise nach Nickmann (2005) erste verwertbare Hinweise liefern.
- Eine Herausforderung stellt in der Praxis auch die Probengewinnung, -transport, -lagerung und Probenvorbereitung und deren Einfluss auf die Probenqualität dar. Hierbei geht es darum, wie der Zerfallsprozess bis zum Probeneinbau verhindert werden kann.
- Der Tonstein in Minden ist ein typischer Vertreter der veränderlich-festen Gesteine. Im frischen Zustand ist er ein Festgestein. Für den Nachweis der Standicherheit unter Berücksichtigung diskreter Trennflächen sind die Scherparameter auf den Trennflächen zu bestimmen und anzusetzen.
- Gleichzeitig verhält sich das veränderlich-feste Gestein im Triaxialversuch unter bodenmechanischen Randbedingungen wie ein feinkörniges Lockergestein mit dem Aufbau von Porenwasserdrücken, sodass zwischen dränierten (effektiven) und undränierten Scherparametern zu unterscheiden ist. Welche der Parameter im konkreten Fall anzuwenden ist, hängt von der Bauaufgabe ab. In der Konsequenz reichen rein bodenmechanische oder felsmechanische Vorgehensweisen bei der Bestimmung der Scherfestigkeit nicht aus. Bei der Bestimmung der dränierten (effektiven) Scherparameter ist vor allen Dingen die Sättigung von großem Einfluss. Weitere Faktoren sind der Grad der Überkonsolidierung sowie die Anisotropie.
- Wünschenswert wäre die Erarbeitung einer durchgehenden Untersuchungsstrategie von der Probengewinnung bis zur Kennwertbestimmung.
- Eine unzureichende Untersuchung des Felsmaterials kann zu Schäden auch nach längerer Zeit oder auch zu unwirtschaftlichen Lösungen führen.



## 5 Literatur *References*

Bönsch, C. (2006): Auswirkungen der Saugspannung auf physikalische und mechanische Eigenschaften von überkonsolidierten Tonen und Tonsteinen im Verwitterungsprozess. Institut für Geowissenschaften, Halle/Saale.

Bossart, P.; Thury, M. (2008): Mont Terri Rock Laboratory – Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.

DIN EN 12370 (1999): Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Widerstandes gegen Kristallisation von Salzen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 14689-1 (2011): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels – Teil 1: Benennung und Beschreibung, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

FGSV (2015): M Fels – Merkblatt über das Bauen mit und im Fels. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

Hekel, U.; Odenwald, B. (2012): Bohrlochversuche zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit von Fels. BAWMitteilungen. Nummer 95, S. 139-150.

Heitzmann, P. (2004): Mont Terri Project – Hydrogeological Synthesis, Osmotic Flow. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.

Kauther, R.; Herten, M.; Montenegro, H.; Odenwald, B. (2013): Geotechnische und geohydraulische Aspekte beim Bau der Weserschleuse in Minden. Geotechnik, Volume 36, Issue 3, S. 137-146.

Keil, Karl (1954): Ingenieurgeologie und Geotechnik. Verlag Wilhelm Knapp, Halle/Saale.

Lal, M. (1999): Shale Stability: Drilling Fluid Interaction and Shale Strength. In: Society of Petroleum Engineers (Hg.): Latin American petroleum industry: opportunities and realities. 6th Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Society of Petroleum Engineers, Paper Number 54356.

Lempp, C. (1979): Die Entfestigung überkonsolidierter, pelitischer Gesteine Süddeutschlands und ihr Einfluss auf die Tragfähigkeit des Straßenuntergrundes, Geowissenschaftliche Fakultät der Eberhard-Karls-Universität. Tübingen.

Lempp, C.; Menezes, F.; Sachwitz, S. (2016): Tonstein als Wirtsgestein: Ein geomechanischer Beitrag über Opalinuston. Geotechnik, online unter: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/gete.201500025/abstract>

Merklein, I. (1982): Limitierende Faktoren des Trocknungs-Befeuchtungs-Zerfalls überkonsolidierter Tonsteine. Eberhard-Karls-Universität, Tübingen.

Nickmann, M. (2009): Abgrenzung und Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter Ingenieurgeologischen Aspekten. Technische Universität, München.

Nickmann, M.; Spaun, G.; Thuro, K. (2005): Untersuchungen zur Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter ingenieurgeologischen Aspekten. In: Moser, M. (Hg.): Veröffentlichungen von der 15. Tagung Ingenieurgeologie, DGGT Fachsektion Ingenieurgeologie, S. 157-162

Popp, T. (2008): Durchführung von Felsmechanischen Untersuchungen, Schleuse Minden. Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig.

Popp, T. (2009): Ergänzung Untersuchungsprogramm BAW, Schleuse Minden. Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig.

Popp, T.; Salzer, (2007): Anisotropy of seismic and mechanical properties of Opalinus clay during triaxial deformation in a multi-anvil apparatus. Physics and Chemistry of the Earth, Volume 13, S. 879-888.

Sieler, U. (2005): Keuper als geotechnisches Material, In: Moser, M. (Hg.): Veröffentlichungen von der 15. Tagung Ingenieurgeologie, DGGT Fachsektion Ingenieurgeologie, S. 173–177.

Simpson, J. P.; Dearing, H. L. (2000): Diffusion Osmosis – An Unrecognized Cause of Shale Instability. In: International Association of Drilling Contractors, Society of Petroleum Engineers (Ed.): IADC/SPE Drilling Conference 2000. Proceedings.com. Society of Petroleum Engineers, Paper no 59190.